

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mass Rapid Transit

2.1.1 Definisi

Mass Rapid Transit yang merupakan sistem transportasi perkotaan mempunyai kriteria utama, yaitu Mass (daya angkut besar), Rapid (waktu tempuh dengan frekuensi tinggi) dan Transit (berhenti di banyak stasiun titik utama perkotaan).

Mass Rapid Transit Jakarta merupakan transportasi massal bermoda kereta yang dibangun dari koridor utara-selatan dan terdiri dari 21 stasiun dimana trase dari stasiun lebak bulus sampai stasiun sisingamangaraja merupakan jalan layang. Struktur Jalan layang Mass Rapid Transit direncanakan supaya mampu menopang kereta dengan double track. Jalan layang tersebut didesain sebagai jembatan dan menggunakan box girder sebagai struktur utama landasan kereta.



Gambar 2.1 Mass Rapid Transit Jakarta
(Sumber: *Jakartamrt.co.id*)

2.1.2 Bentuk-Bentuk Mass Rapid Transit

2.1.2.1 Bus Rapid Transit (BRT)

Bus Rapid Transit (BRT) adalah moda transportasi massal berbasis bus yang mempunyai dsain, pelayanan, dan infrastruktur yang dikustomisasi untuk meningkatkan kualitas sistem dan menyingkirkan hal-hal seperti penundaan

kedatangan yang sering ditemui pada sistem bus biasanya. BRT menawarkan mobilitas, biaya terjangkau, jalur khusus, halte yang tertutup, sistem pembayaan di halte bus dan sistem informasi yang baik bagi penumpang. (*Institute for Transportation & Development Policy*).



Gambar 2.2 Bus Rapid Transit

(Sumber: *Institute for Transportation & Development Policy*)

2.1.2.2 Light Rapid Transit (LRT)

Light Rapid Transit (LRT) merupakan sistem transportasi berbasis metropolitan dengan menggunakan kereta rel listrik yang ditandai dengan kemampuan mengoperasikan gerbong pendek seperti monorel dan trem disepanjang jalur eksklusif baik di tanah, udara atau di jalan (GTZ, 2003).



Gambar 2.3 Light Rapid Transit

(Sumber: *construction-post.com*)

2.1.2.3 Heavy Rapid Transit (HRT)

Heavy Rapid Transit (HRT) merupakan sistem transportasi metropolitan yang menggunakan kereta berkinerja tinggi, digerakkan secara elektrik, beroperasi di jalur eksklusif, tanpa jalur persilangan dengan peron stasiun yang besar, serta memiliki kapasitas besar (GTZ, 2003).



Gambar 2.4 Heavy Rapid Transit
(Sumber: masstransportationhub.com)

2.1.3 Berdasarkan Area Pelayanan

2.1.3.1 Metro

Metro merupakan sistem kereta berat yang pada umumnya melingkupi area yang lebih kecil, memiliki frekuensi yang lebih padat, dan berjalan dalam jalur yang terpisah (dibawah tanah atau diatas).

2.1.3.2 Commuter Rail

Commuter Rail merupakan layanan sistem transportasi kereta api dengan penumpang dari pusat kota dan pinggiran kota yang menarik sejumlah besar orang yang melakukan perjalanan setiap hari. Kemampuannya untuk berbagi jalur dengan kereta antar kota membuat biaya pembangunan dapat ditekan cukup besar.

2.2 Struktur Utama

Struktur utama jalan layang menggunakan box girder berbentuk trapesium. Box girder memiliki manfaat utama yaitu momen inersia yang tinggi dalam kombinasi dengan berat sendiri yang relatif ringan, karena ada rongga yang

terletak ditengah penampang sehingga cocok untuk struktur dengan bentang yang panjang.

2.2.1 Beton Prategang

Menurut SNI 2847-2013, Beton prategang yaitu elemen baja mutu tinggi seperti kawat, batang, atau strand, atau bundel elemen seperti itu, yang digunakan untuk menyalurkan gaya prategang ke beton.

2.2.2 Gaya Prategang

Gaya prategang yaitu gaya yang menyebabkan beton berada dalam keadaan tekan akibat tendon yang menyatu dengan beton ditarik dengan besaran tertentu. Momen total yang terjadi mempengaruhi besarnya gaya prategang, untuk memenuhi kontrol batas pada saat kritis dilakukan dengan menyalurkan gaya gaya tersebut.

2.2.2.1 Kehilangan gaya prategang

Kehilangan gaya prategang adalah elemen beton yang mengalami proses reduksi yang progresif selama waktu kurang lebih lima tahun pada saat pemberian gaya prategang awal. Dengan demikian, kehilangan gaya prategang dapat dicantumkan pada setiap pembebanan, mulai dari tahap transfer yang gaya prategang terjadi pada beton sampai ke tahap service yang terjadi pada saat beban kerja sudah bekerja dan mencapai ultimit. Kehilangan gaya prategang tersebut antara lain (Nawy, 2001) :

1. Pada saat transfer (konstruksi)

a. Pendekatan elastis beton.

Beton memendek pada saat gaya prategang bekerja padanya. Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya. Rumus yang dapat digunakan saat perhitungan kehilangan gaya prategang yaitu:

$$ES = K_{es} E_s \frac{f_{cir}}{E_{ci}}$$

Dimana :

f_{cir} = tegangan beton akibat gaya prategang yang efektif setelah gaya prategang telah dikerjakan pada beton yang terletak pada garis berat baja (c.g.s).

$f_o = 0,9 \times F_i$ (untuk pra-tarik)
 $= F_i$ (untuk pasca tarik)

$K_{es} = 0,5$ (untuk pasca tarik)

b. Gesekan kabel dan wooble effect

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan terjadi diantara tendon dan bahan disekelilingnya, baik itu berupa beton atau selubung (sheathing), dan apakah diberi pelumas atau tidak. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan kelengkungan. Rumus yang dapat digunakan pada perhitungan kehilangan gaya prategang akibat gesekan dan wooble effect yaitu:

$$F_x = f_o \times e^{-(\mu\alpha + KL)}$$

Dimana :

F_x = gaya prategang akhir sesudah loss akibat wooble effect dan gesekan

f_o = gaya prategang awal

μ = koefisien gesekan berkisar 0,15-0,25 (terdapat pada tabel T.Y.Lin, hal. 117)

K = koefisien wooble = 0,0026

α = Perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan

c. Slip Angkur

Kebanyakan pada sistem pasca-tarik, saat tendon ditarik sampai menemukan nilai yang penuh dongkrak dapat dilepas dan gaya prategang dapat dialihkan pada angkur. Pada saat mengalami tegangan di peralihan untuk berdeformasi, dapat terjadi tendon sedikit tergelincir. Untuk perletakan pengangkuran langsung, kepala dan mur mengalami sedikit deformasi pada waktu pelepasan dongkrak. Nilai rata-rata untuk deformasi semacam itu hanya sekitar 0,8 mm. Jika pengganjalan panjang dibutuhkan untuk menahan kawat yang diperpanjang di tempatnya, akan ada deformasi

pada pengganjal pada saat peralihan gaya prategang. Untuk rumus yang digunakan dalam menghitung kehilangan gaya prategang akibat deformasi pengangkuran, yaitu:

$$\Delta f_s = \frac{\Delta \alpha E_s}{L}$$

Dimana :

L = Panjang total kabel

2. Pada saat beban bekerja

a. Rangkak beton (CR)

Sifat beton salah satunya adalah bertambahnya waktu yang dapat mengalami tambahan regangan akibat beban tetap (mati). Deformasi atau regangan yang berasal dari perilaku yang bergantung pada waktu merupakan fungsi dari besarnya beban yang bekerja, lamanya, serta sifat beton yang meliputi proporsi campurannya, kondisi perawatannya, umur elemen pada saat dibebani pertama kali, dan kondisi lingkungannya. Perhitungan kehilangan gaya prategang akibat rangkakat beton dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$CR = K_{cr} \times \frac{E_s}{E_c} \times (f_{cir} - f_{cds})$$

$$f_{cds} = \frac{M \times e}{I}$$

Dimana :

K_{cr} = 1,6 untuk komponen struktur pasca-tarik

f_{cds} = tegangan beton pada garis berat tendon akibat seluruh beban mati yang bekerja pada komponen struktur setelah diberi gaya prategang

E_s = modulus elastis tendon prategang

E_c = modulus elastis beton umur 28 hari, yang bersesuaian dengan f_c'

b. Susut beton (SH)

Faktor yang mempengaruhi susut beton yaitu rangkakat, waktu akhir perawatan sampai saat bekerjanya gaya prategang, perbandingan antar volume dan permukaan, serta kelembaban relatif. Perhitungan gaya

prategang yang diakibatkan oleh susut beton dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$SH = 8,2 \cdot 10^{-6} \times K_{sh} \times E_s \times \left(1 - 0,06 \times \frac{V}{S}\right) \times (100 - RH)$$

Dimana:

K_{sh} = 0,73 (berdasarkan tabel 4-4 buku T.Y.Lin, hal 109)

V = luas balok

S = Keliling balok

RH = kelembaban udara rata-rata diambil 80%

c. Relaksasi baja (RE)

Perubahan yang dialami oleh balok pratekan merupakan regangan baja yang konstan yang terletak pada dalam tendon jika terjadi rangkai maka relaksasi baja tersebut tergantung pada waktu. Pada perpindahan elastis (ES), selain itu CR dan SH juga termasuk pada kehilangan gaya pratekan yang tergantung pada waktu, maka dari itu menimbulkan terjadinya pengurangan yang kontinu pada tegangan tendon. Rumus yang dapat digunakan dalam menghitung kehilangan gaya prategang yang diakibatkan oleh relaksasi baja yaitu sebagai berikut :

$$RE = (K_{re} - J (SH + CR + ES)) \times C$$

Sebagaimana :

Tendon yang dapat dipakai merupakan strand tipe atau kawat stress relieved derajat 1860 Mpa. Sehingga di dapat:

K_{re} = 138 Mpa (tabel 4-5 hal. 111 T.Y. Lin)

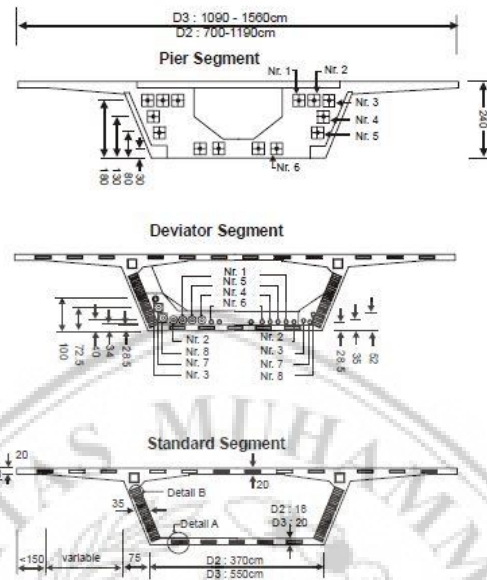
J = 0,15 (tabel 4-5 hal. 111 T.Y. Lin)

C = 1

2.2.2.2 Precast Segmentasi Box Girder

Precast segmental box girder adalah salah satu perkembangan dalam pelaksanaan konstruksi jembatan yang tergolong baru dalam beberapa tahun terakhir. Berbeda dengan sistem konstruksi monolit, sebuah jembatan segmental

box girder terdiri dari segmen-segmen pracetak maupun cor ditempat yang diprategan bersama-sama oleh tendon (Rombach, 2002).



Gambar 2.5 Tipe Segmen Box Girder
(Sumber : Jurnal Prof. Dr. –Ing. G. Rombach, 2002)

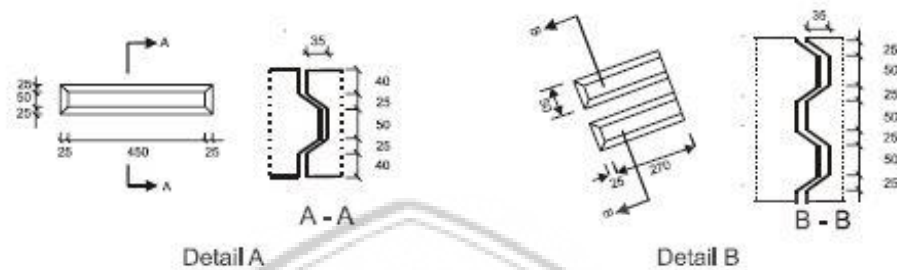
2.2.2.3 Elemen Struktural Jembatan Segmental Box Girder

Jembatan segmental seharusnya dibangun untuk menghindari adanya sambungan kabel post-tension seperti struktur bentang tunggal. Sehubungan dengan adanya eksternal post-tension dapat diketahui memerlukan tiga macam segmen yang berbeda, diantaranya (Rombach, 2002) :

1. Segment Pier: Letak Pier Segment tepat diatas abutment dan memerlukan diafragma yang kokoh untuk dapat memperkaku box girder. Selain itu berfungsi sebagai bidang pengankuran dari tendon prategan.
2. Deviator Segment: Deviator Segment diperlukan untuk pengaturan deviasi tendon.
3. Standart Segment: Dimensi standart box girder yang digunakan.

2.2.2.4 Desain Elemen Sambungan

Sambungan pada jembatan segmental telah dirancang sesuai dengan rekomendasi AASHTO. Detail sambungan dapat di lihat pada gambar (Rombach, 2002).



Gambar 2.6 Detail sambungan pada segmental box girder

(Sumber : Jurnal Prof. Dr. –Ing. G. Rombach, 2002)

2.2.2.5 Balok Pratekan Menerus Statis Tentu

Kontinuitas pada konstruksi beton prategang dicapai dengan memakai kabel-kabel melengkung atau lurus yang menerus sepanjang beberapa bentang. Juga dimungkinkan untuk menimbulkan kontinuitas antara dua balok pracetak dengan memakai “kabel tertutup” (cap cable). Alternatif lain, tendon-tendon lurus yang pendek dapat dipakai diatas tumpuan untuk menimbulkan kontinuitas antara dua balok prategang pracetak. Beberapa metode untuk mengembangkan kontinuitas pada konstruksi beton prategang telah diuji secara kritis oleh Lin dan Visvesvaraya mengenai kelayakannya untuk dipakai dalam suatu situasi tertentu (Raju, 1989).

2.2.3 Metode Konstruksi Struktur Utama

Menurut buku Prestressed Concrete Segmental Bridges, untuk pelaksanaan metode kantilever membutuhkan adanya tendon-tendon yang berfungsi sebagai penompang setiap segmen Box Girder. Tendon yang digunakan terdiri dari dua jenis yaitu cantilever tendons dan continuity tendons.

1. Cantilever tendons terletak di area momen negative yang di jacking saat setiap segmen box girder ditempatkan. Cantilever tendons dapat

diperpanjang hingga ke bagian bawah dengan melewati badan segmen atau dapat juga berhenti hanya pada bagian atas segmen.

2. Continuity tendons bekerja untuk menyediakan gaya prestressing di area momen positif. Continuity tendons ditempatkan dan di jacking setelah penutup sambungan telah ditempatkan.

2.2.4 Kriteria Pembebanan

2.2.4.1 Beban mati

1. Berat Sendiri

Berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktur lain yang dipikulnya, termasuk dalam hal beban bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural, ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap.

Tabel 2.1 - Faktor beban untuk berat sendiri

Tipe beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1.00	1.10	0.90
	Alumunium	1.00	1.10	0.90
	Beton pracetak	1.00	1.20	0.85
	Beton cor ditempat	1.00	1.30	0.75
	Kayu	1.00	1.40	0.70

(Sumber: SNI 1725-2016)

2. Beban Mati Tambahan

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk sebuah beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan. Dalam hal tertentu, nilai faktor beban mati tambahan yang berbeda dengan ketentuan pada tabel boleh digunakan dengan persetujuan instansi wewenang. Hal ini bisa dilakukan apabila instansi tersebut melakukan pengawasan terhadap beban mati tambahan pada jembatan, sehingga tidak dilampaui selama umur jembatan.

Tabel 2.2 - Faktor pada beban mati tambahan

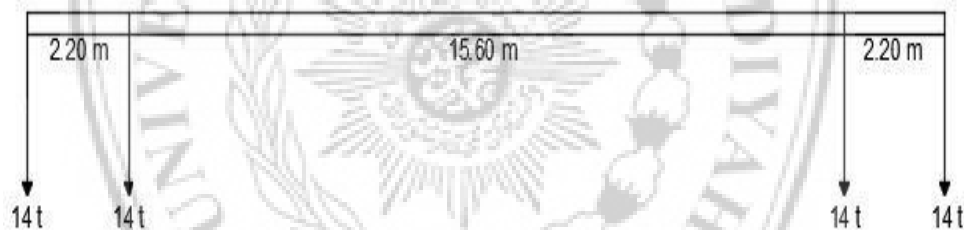
Tipe beban	Faktor beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1.00 ⁽¹⁾	2.00	0.70
	Khusus (Terawasi)	1.00	1.40	0.80
Catatan ⁽¹⁾ : Faktor beban layan sebesar 1.3 digunakan untuk utilitas				

(Sumber: SNI 1725-2016)

2.2.4.2 Beban hidup

1. Beban Kereta

Beban lokomotif, kereta listrik dan beban kereta diesel dianggap sebagai beban kereta dan harus ditetapkan berdasarkan nilai karakteristik dan metode pembebanan. Beban hidup yang digunakan adalah beban gandar terbesar sesuai rencana sarana perkeretaapian yang dioperasikan atau skema dari rencana muatan.



Gambar 2.7 Skema Beban Kereta

2. Beban Rem dan traksi

Beban rem dan traksi yang terjadi adalah 25% dari beban kereta, beban rem dan traksi bekerja pada saat pusat gaya berat kereta ke arah rel (secara longitudinal). Untuk beban kereta listrik karakteristik beban nilai dihitung sebagai berikut:

$$\text{Beban rem} = \left(0.20 + \frac{0.80}{M} L \right) T$$

Dimana :

M = Panjang 1 kereta = 16,20 m

L = Panjang beban kereta dengan efek terbesar

T = Beban gandar

3. Beban Kejut

Beban kejut diperoleh dengan mengalihkan faktor i terhadap beban kereta. Perhitungan koefisien kejut desain batas ultimate elemen penahan jalan rel menggunakan rumus sebagai berikut:

$$i = K_a \cdot \alpha + \frac{10}{65+L} \leq 0.6$$

Dimana:

I = Koefisien kejut desain

K_a = Koefisien jenis kereta

α = Parameter percepatan

$$= \frac{V}{7,2n \cdot L}$$

V = kecepatan maksimum kereta (km/jam)

N = Frekuensi alami dasar elemen, dimana

$$n \geq 55 \cdot L^{-0,8} \text{ untuk } L \geq 10 \text{ m}$$

$$n < 55 \cdot L^{-0,8} \text{ untuk } L < 10 \text{ m}$$

L = Panjang bentang (m)

Tabel 2.3 Koefisien K_a

Koefisien beban kereta	Kecepatan maksimum	Kondisi keadaan lain	K_a
Beban Lokomotif	$V \leq 130 \text{ km/jam}$	$L \geq 10 \text{ m}$	1,0
		$L < 10 \text{ m dan } a \leq 0,1$	1,0
		$L < 10 \text{ m dan } a > 0,1$	1,5
Kereta Listrik	$V \leq 160 \text{ km/jam}$	-	1,0
Kereta cepat	$V \leq 160 \text{ km/jam}$	-	1,0

2.2.4.3 Beban lingkungan

1. Beban Angin

Beban angin bekerja tegak lurus rel, secara horisontal, tipikal nilainya adalah:

a. $3,0 \text{ kN/m}^2$ pada areal proyeksi vertikal jembatan tanpa kereta di atasnya.

Namun demikian, $2,0 \text{ kN/m}^2$ pada areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin, tidak termasuk areal sistem lantai.

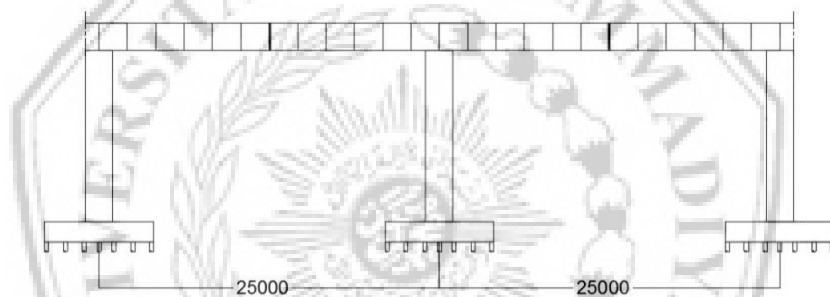
- b. $1,5 \text{ kN/m}^2$ pada areal kereta dan jembatan, dengan kereta di atasnya, pengecualian $1,2 \text{ kN/m}^2$ untuk jembatan selain gelagar dek/rusuk atau jembatan komposit, sedangkan $0,8 \text{ kN/m}^2$ untuk areal proyeksi rangka batang pada arah datangnya angin.

2. Beban Gempa

Beban gempa yang digunakan sesuai dengan peraturan gempa yang berlaku yaitu SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan.

2.3 Wilayah Studi

Perencanaan pada struktur utama Mass Rapid Transit Jakarta CP103 bagian Haji Nawi yaitu dimulai dari STA 5+360 – STA 6+560.



Gambar 2.8 Potongan memanjang Struktur Utama



Gambar 2.9 Potongan melintang